

AD6676 —

новое слово в проектировании

радиорелейных линий диапазона СВЧ

Радиорелейные линии (радиоканалы прямой связи «точка-точка») СВЧ-диапазона являются интегральной частью сети мобильной сотовой связи и используются для реализации транзитного канала передачи данных между базовыми станциями (BTS/NodeB) и контроллерами радиосети (BSC/RNC) более чем в 50% случаев по всему миру, когда организация оптоволоконных транзитных каналов экономически нецелесообразна. Бурное развитие сервисов передачи данных в мобильных сетях в последние годы, вызванное популярностью смартфонов, привело к возросшей потребности к передаче широкополосного трафика (например, потокового видеоизображения) и ужесточению требований к пропускной способности оборудования транзитных радиоканалов.

**Автор Пол Хендрикс
(Paul Hendriks)**

**Перевод: Александр Сотников
alexander.sotnikov@analog.com.ru**

Для увеличения пропускной способности с учетом нужд LTE и LTE-Advanced необходимы следующие шаги:

- Переход от используемого сегодня формата модуляции КАМ-256 к форматам модуляции более высокого порядка (до КАМ-4096), что даст увеличение информационной емкости в каналах на 50% при сохранении их полосы.
- Поддержка каналов с шириной полосы 112 МГц вместо сегодняшних 56 МГц в традиционном диапазоне частот 6–42 ГГц. Каждое удвоение полосы канала обеспечивает пропорциональное увеличение пропускной способности, если отношение сигнал/шум сохраняет постоянное значение.
- Применение перспективных методов, таких как поляризационное разделение, агрегирование каналов и NxN MIMO в пределах прямой видимости.

Как это обычно бывает при проектировании систем связи, подобное увеличение пропускной способности имеет свою цену. Для поддержки форматов КАМ высокого порядка и большей ширины полосы СВЧ-канал связи должен иметь больший динамический диапазон, поскольку чувствительность приемника уменьшается на 3 дБ при каждом удвоении алфавита КАМ или ширины полосы. Еще один аспект проектирования заключается в том, что оборудование должно быть конфигурируемым и поддерживать все возможные рабочие сценарии, но, в то же время, оно должно обеспечивать высокие характеристики и низкую стоимость без чрезмерного ужесточения требований к схеме АРУ и фильтрации в приемнике.

В последнее время также возрастает интерес к полнофункциональным наружным (распологающимся вне помещения) модулям (full outdoor units, full ODU), в которых полнофункциональный радиомодем и трансивер

объединяются с модулями коммутации/мультиплексирования и интерфейсными модулями в автономном блоке, монтируемом на антенной мачте или эквивалентной конструкции. Стимулами к этому являются необходимость сокращения капитальных и эксплуатационных затрат на новых объектах либо пространственные ограничения на существующих объектах. В традиционных сплит-системах с внутренним (indoor unit, IDU) и наружным модулями каскад ВЧ/СВЧ ODU подключается по коаксиальному кабелю к модулю, находящемуся внутри помещения. Коаксиальный кабель может иметь длину до 300 м, а для передачи по нему двунаправленного трафика используется антенный разделитель (дуплексер), который осуществляет разделение сигнала ПЧ приемника, центрального относительно 140 МГц, и сигнала ПЧ передатчика, центрального относительно некоторой частоты в диапазоне 340–400 МГц.

Несмотря на то, что эта тенденция получает все большее распространение, большинство поставляемого на сегодня и ожидаемого в обозримом будущем оборудования диапазона СВЧ — это традиционные сплит-системы IDU/ODU. Таким образом, возможность использования общей архитектуры трансивера оконечного модема для поддержки как традиционных систем, так и платформ ODU следующего поколения дала бы много преимуществ. Последние достижения в технологиях высокоскоростных ЦАП и АЦП, обладающих быстродействием до 1,5 GSPS (миллиардов выборок в секунду) и выше, теперь позволяют осуществлять синтез и оцифровку сигналов КАМ на высоких ПЧ с исключительной точностью, поддерживая работу с форматами КАМ-4096 (и выше). Помимо отказа

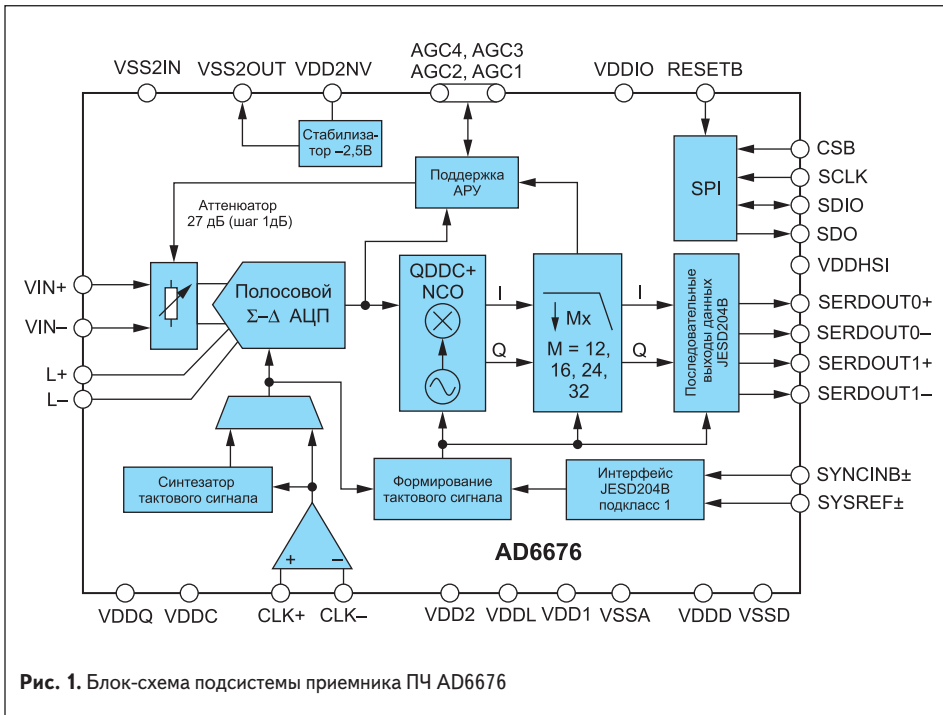


Рис. 1. Блок-схема подсистемы приемника ПЧ AD6676

от схем коррекции погрешностей квадратур, необходимых в традиционных аналоговых реализациях квадратурных модуляторов/демодуляторов, широкий динамический диапазон и высокий коэффициент избыточной дискретизации позволяют выполнять основную часть фильтрации в цифровом виде, сократив количество цепей аналоговой

фильтрации и требуемых для их компенсации цифровых частотных корректоров. Благодаря поддержанию исключительного уровня модуля вектора ошибки (error vector magnitude, EVM) без необходимости в калибровке передатчика высокоскоростные ЦАП, такие как AD9142 и AD9152, уже начинают заменять традиционные реализации на базе двух каналов ЦАП

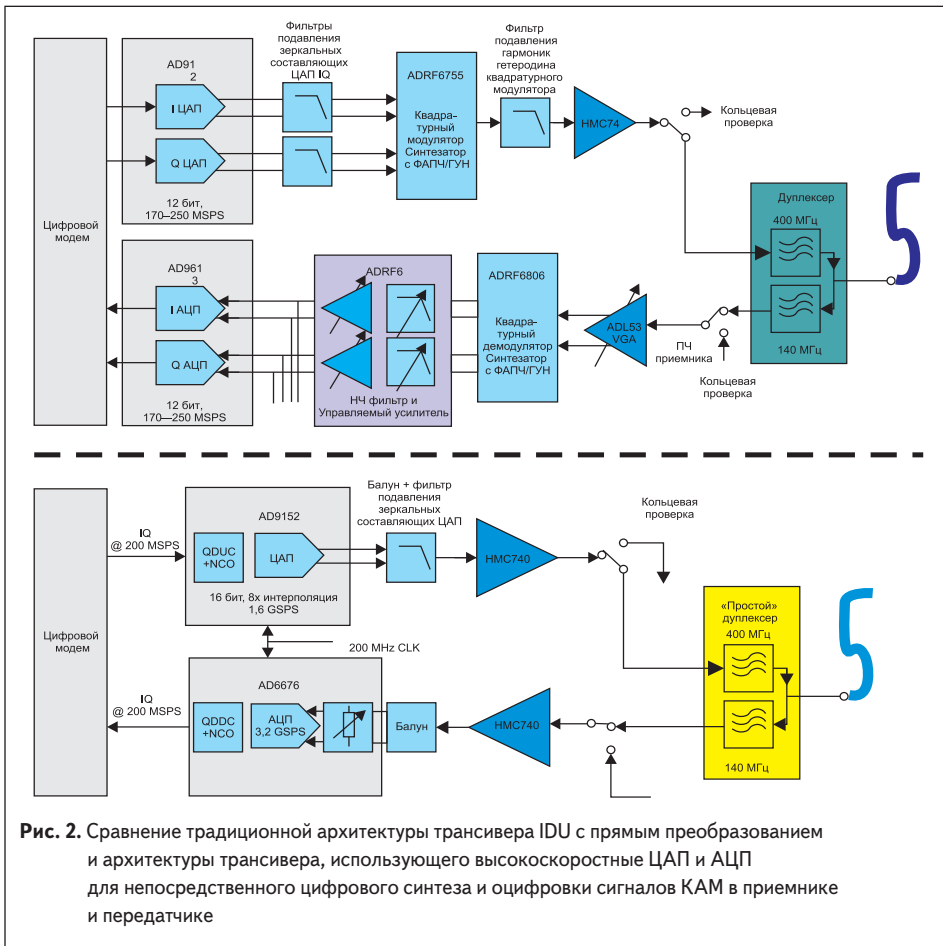


Рис. 2. Сравнение традиционной архитектуры трансивера IDU с прямым преобразованием и архитектуры трансивера, использующего высокоскоростные ЦАП и АЦП для непосредственного цифрового синтеза и оцифровки сигналов КАМ в приемнике и передатчике

и квадратурного модулятора в задаче синтеза широкополосных сигналов КАМ в сигнальных трактах передатчиков. В свою очередь, АЦП с быстродействием более 1,5 GSPS, которые могли бы применяться в сигнальных трактах приемников, до недавнего времени отсутствовали — пока не появилась микросхема AD6676.

AD6676 — это первая в отрасли широкополосная подсистема приемника ПЧ (рис. 1), построенная на базе полосового сигма-дельта АЦП, который позволяет работать с полосой сигналов ПЧ до 160 МГц при частоте внутреннего тактового сигнала до 3,2 ГГц. Именно высокий коэффициент избыточной дискретизации сигма-дельта АЦП существенно упрощает требования к аналоговой фильтрации сигнала ПЧ. Эта фильтрация необходима для подавления соседних каналов (и блокирующих сигналов/помех), которые после преобразования в АЦП могут «накладываться» на полезный сигнал, приводя к снижению чувствительности приемника. Комбинация широкого динамического диапазона и низкого порога спектральной плотности шума, который составляет -160 дБ к полной шкале (dBFS) на Гц (для узкополосных каналов КАМ), смягчает требования к развязке между цепями приема и передачи в дуплексере или диапазону аналоговой схемы АРУ, используемой для компенсации замираний в канале. AD6676 содержит интегрированный цифровой аттенуатор с диапазоном регулировки 27 дБ и разрешением 1 дБ, который может быть использован для калибровки статической погрешности коэффициента усиления, вызванной отклонениями номиналов компонентов от идеальных значений и потерями в коаксиальном кабеле.

Рассмотрим сначала, каким образом применение подсистемы приемника ПЧ AD6676 и быстродействующего ЦАП, например AD9152, может привести к существенному упрощению традиционного трансивера IDU и при этом улучшить его характеристики. В верхней части рис. 2 изображена реализация трансивера с прямым преобразованием, которая используется для работы как правило, с низкими ПЧ приемника и передатчика — 100 и 400 МГц соответственно. Недостатки трансиверов с прямым преобразованием хорошо известны, однако их можно преодолеть при помощи калибровки баланса квадратур, коррекции смещения постоянной составляющей, использования перестраиваемых фильтров квадратурных модулирующих сигналов, а также грамотного проектирования дуплексера. Выпускаемые сегодня трансиверы IDU предыдущего поколения способны работать с КАМ-256 и максимальной полосой канала 56 МГц, однако двукратное увеличение полосы канала или увеличение порядка КАМ до восьми раз для получения большей информационной емкости создает большие сложности при проектировании архитектуры с прямым преобразованием. Последние достижения в технологии высокоскоростных АЦП/ЦАП не в последнюю очередь обусловлены желанием заменить классические подходы «цифровым» IDU, как показано под нижней части рис. 2.

Эта реализация трансивера обеспечивает близкие к идеальным характеристики при использовании всего четырех микросхем и существенно смягчает требования к фильтрации.

На стороне передатчика используется высокоскоростной ЦАП, например AD9152, который работает с тактовой частотой 1,6 GSPS и способен синтезировать сигнал КАМ-1024 с полосой 112 МГц непосредственно на ПЧ. Он обеспечивает исключительные характеристики EVM, что позволяет резервировать основную часть бюджета погрешностей передатчика для ODU, аддитивные эффекты фазового шума и нелинейности которого будут вносить доминирующий вклад в ухудшение EVM. Для подавления первой зеркальной составляющей выходного сигнала ЦАП, появляющейся на частоте 1,2 ГГц, по-прежнему необходим фильтр нижних частот, однако требования к его ослаблению смягчаются на величину до 12 дБ по сравнению с фильтром подавления гармоник гетеродина, требуемым для фильтрации третьей гармоники частоты гетеродина в квадратурных модуляторах, которая также появляется на частоте 1,2 ГГц. AD9152 дает возможность осуществлять регулировку мощности передатчика для компенсации потерь в кабеле в диапазоне 15 дБ с пренебрежимо малым ухудшением EVM сигналов КАМ.

На приемной стороне AD6676 выполняет оцифровку сигналов КАМ-1024 в полосе канала 112 МГц с исключительными точностью и динамическим диапазоном, даже при довольно большом уровне проникновения сигнала передатчика, вызванном смягчением требований к фильтру дуплексера, как показано на рис. 3. В данном примере AD6676 был сконфигурирован для работы с полосой канала 112 МГц, а коэффициент ослабления внутреннего аттенюатора был установлен на уровне 3 дБ, так что эффективный приведенный к входу предварительного усилителя НМС740 коэффициент шума

сохранял значение приблизительно 10 дБ. Левый график на рис. 3 иллюстрирует результат БПФ выходных данных сигма-дельта АЦП AD6676 (используется исключительно в демонстрационных целях) при подаче на вход комбинации немодулированного гармонического сигнала с уровнем $-17,2$ дБм на частоте 143 МГц, играющего роль полезного сигнала, и сигнала сквозного прохождения передатчика с уровнем -26 дБм, центрального относительно 400 МГц. На рисунке можно видеть, как за счет перераспределения спектральной плотности шума в перестраиваемом полосовом сигма-дельта АЦП вокруг рабочей ПЧ создается область широкого динамического диапазона (уровень шума до -160 dBFS/Гц). Правый график на рис. 3 иллюстрирует результат БПФ квадратурного цифрового сигнала с разрядностью 16 бит и частотой дискретизации 200 MSPS, центрального относительно «нулевой ПЧ», который получен после цифрового преобразования частоты вниз и фильтрации с коэффициентом децимации $16\times$. Цифровой фильтр обеспечивает ослабление $+85$ дБ, устраняя внеполосный шум и сигнал прямого прохождения передатчика, которые могли бы попасть в полосу пропускания 112 МГц из-за спектрального наложения. Остаточный шум, находящийся вне полосы 112 МГц, устраняется фильтрами RRC модема.

В данном тесте, который проводился в условиях сильного сигнала (-2 dBFS), уровень внутриполосного шума составлял $-68,6$ dBFS. Если вместо немодулированного гармонического сигнала на приемник подать сигнал КАМ-1024 полной шкалы с отношением пиковой мощности к среднеквадратической, равным 10 дБ, от значения полной шкалы АЦП потребуется дополнительно отступить 7 дБ во избежание ограничения. В данном случае мощность сигнала на входе приемника IDU составит -9 dBFS (или $-24,2$ дБм), а отношение сигнал/шум — примерно 60 дБ. Для упро-

щения схемы фильтра дуплексера требуемая величина подавления сквозного прохождения сигнала передатчика в приемник не должна превышать примерно 20 дБ. При этом сигнал передатчика, имеющий мощность -6 дБм, после прохождения через дуплексер будет иметь мощность -26 дБм на входе предварительного усилителя приемника. В инсталляциях с небольшой длиной кабеля между IDU и ODU уровень ослабления внутреннего аттенюатора AD6676 можно увеличить, что позволит работать с сигналами КАМ еще большего уровня на входе ODU.

Очень важной характеристикой приемника IDU является возможность принимать сигналы КАМ при крайне низких уровнях чувствительности (вероятность битовых ошибок $BER < 10^{-6}$ при кодировании с исправлением ошибок) в присутствии близкорасположенного мешающего сигнала. Вероятно, наиболее сложным для прохождения испытаний тестом (в соответствии со спецификацией ETSI EN 301 390 V1.2.1) является тест, в котором мешающий (блокирующий) немодулированный сигнал с мощностью на 30 дБ выше мощности сигнала КАМ подается при отстройке частоты всего на $2,5\times$ ширины полосы канала от полезного сигнала. Обратите внимание на то, что именно эта характеристика преимущественно определяет требования к перестраиваемым фильтрам или банкам коммутируемых фильтров в современных приемниках, поскольку модем должен поддерживать работу с шириной полосы каналов 3,5–56 МГц. В предыдущем примере рассматривался случай с шириной полосы канала 112 МГц, которая предлагается к использованию в системах следующего поколения. При такой ширине канала разумно предположить, что мешающий блокирующий сигнал будет в достаточной степени подавляться канальным фильтром с фиксированной полосой, который также обеспечивает подавление зеркальных составляющих перед последним каскадом понижения частоты в ВЧ-тракте ODU.

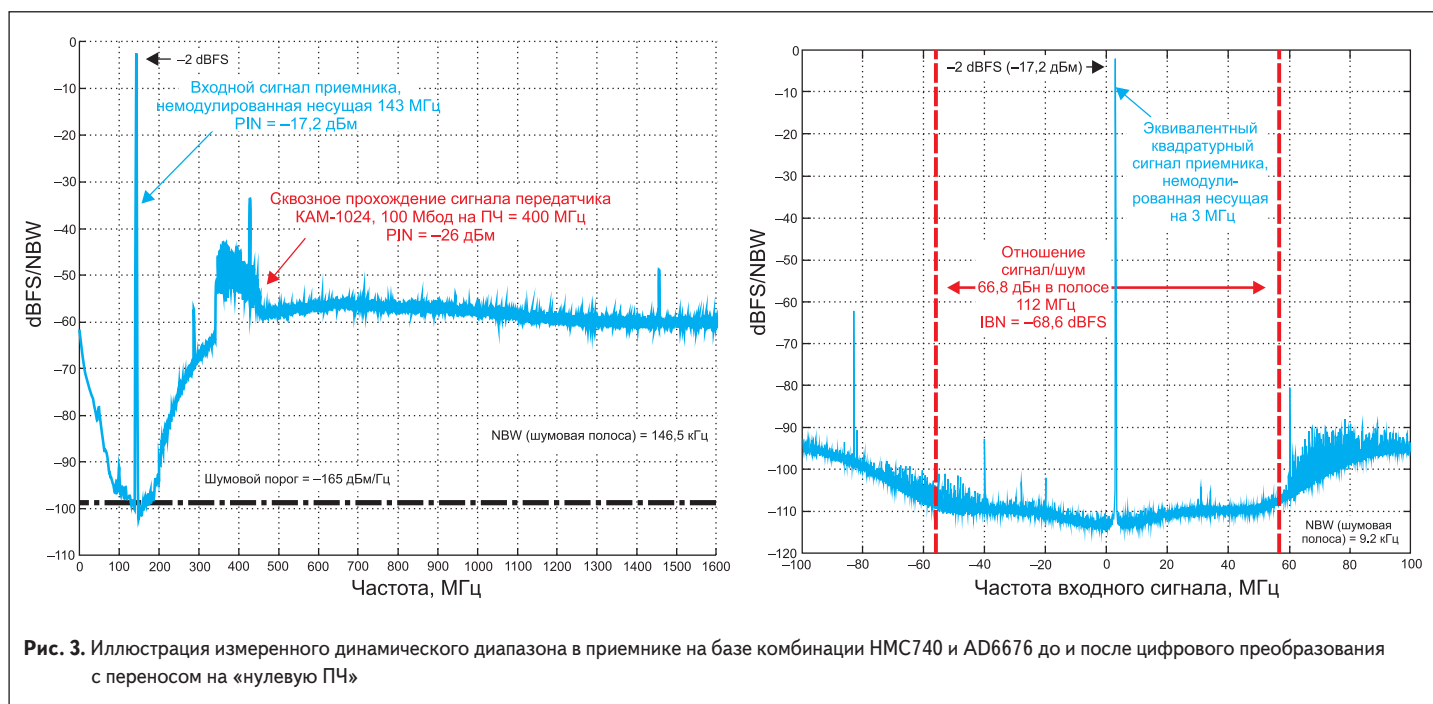


Рис. 3. Иллюстрация измеренного динамического диапазона в приемнике на базе комбинации НМС740 и AD6676 до и после цифрового преобразования с переносом на «нулевую ПЧ»

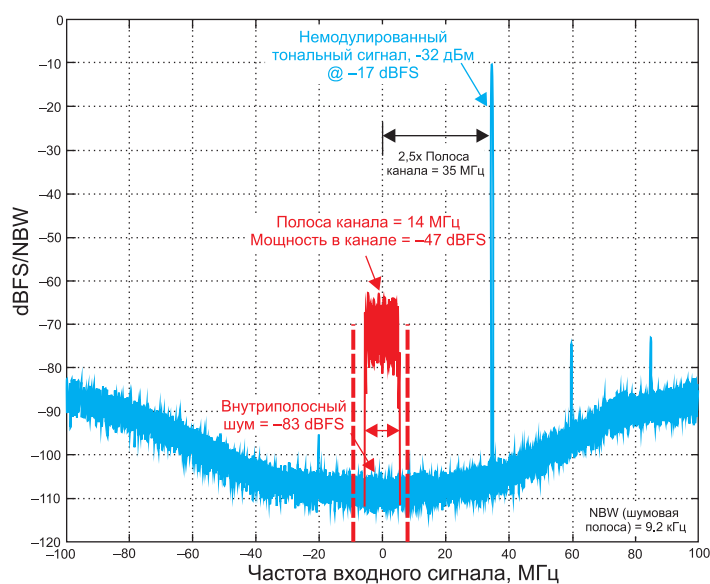


Рис. 4. Широкий динамический диапазон AD6676 упрощает требования к фильтрации в приемнике, позволяя работать при сильных, близко расположенных по частоте помехах

Этот же фильтр должен по-прежнему обеспечивать достаточное подавление блокирующего сигнала при отстройке на 70 и 140 МГц для ширины полосы 28 и 56 МГц соответственно. Для каналов с шириной полосы 14 МГц и менее гармонический сигнал будет попадать в полосу пропускания фильтров и поэтому должен быть подавлен с помощью дополнительной полосовой фильтрации на частоте 140 МГц или быть оцифрован в АЦП и затем отфильтрован в цифровом виде.

Архитектура приемника IDU на базе AD6676 обладает достаточным динамическим диапазоном для поддержки данного сценария без дополнительной фильтрации. На рис. 4 изображен результат БПФ выходного сигнала AD6676 в той же схеме приемника, которая использовалась при получении графиков на рис. 3. Единственное отличие заключается в том, что полоса перестраиваемого сигма-дельта АЦП была уменьшена до 56 МГц. В этом примере, помимо сигнала сквозного прохождения от передатчика с мощностью -26 дБм на частоте 400 МГц, был добавлен немодулированный гармонический сигнал на частоте 175 МГц (отстройка на 35 МГц), имеющий мощность -32 дБм. Этот уровень мощности соответствует уровню -17 dBFS

на входе AD6676 и на 30 дБ превышает требуемый при минимальной чувствительности (отношение сигнал/шум 36 дБ) уровень сигнала КАМ-1024, равный -47 dBFS. Уровень мешающего гармонического сигнала можно поднять на 15 дБ, подчеркнув запас по мощности помехи, что свидетельствует о большом запасе по вкладу шума цепей ВЧ/СВЧ в проекте. В отсутствие блокирующего сигнала уровень полезного сигнала КАМ-1024 можно поднять на 38 дБ, упростив работу приемника IDU в условиях замираний за счет увеличения динамического диапазона.

Те же преимущества, которые широкий динамический диапазон AD6676 дает при проектировании IDU, могут быть использованы при проектировании полнофункционального приемника ODU. Рис. 5 иллюстрирует возможный вариант использования AD6676 в приемном тракте ODU диапазона 18–23 ГГц в комбинации с балансным ВЧ-смесителем (ADL5801), смесителем СВЧ с подавлением зеркального канала (HMC966) и усилителем ВЧ с переменным коэффициентом усиления (ADL5246). Схема также может быть модифицирована для работы с другими участками СВЧ-диапазона в полосе 6–43 ГГц путем выбора других смесителей

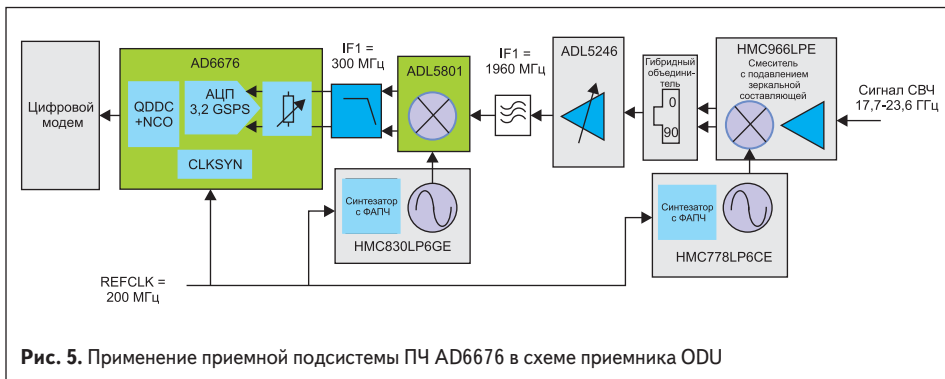


Рис. 5. Применение приемной подсистемы ПЧ AD6676 в схеме приемника ODU

СВЧ, синтезаторов с ФАПЧ и, возможно, другого значения первой ПЧ. Поскольку в полнофункциональном ODU отсутствует кабель, который ограничивал бы выбор ПЧ, AD6676 можно сконфигурировать для работы с более высокой ПЧ, например 300 МГц, тем самым дополнительно упростив требования к подавлению зеркальных составляющих в схемах фильтрации. AD6676 может быть подключен к ВЧ-смесителю напрямую, либо через простой фильтр нижних частот третьего порядка, если необходимо обеспечить дополнительное подавление побочных составляющих, возникающих в смесителе. Характеристики полосового фильтра на частоте 1960 МГц выбираются исходя из требования поддержки полосы канала до 112 МГц. При установке attenuатора AD6676 в 0 дБ суммарный шумовой порог комбинации ADL5801 и AD6676 составляет менее -157 dBFS/Гц для полосы канала 56 МГц, что соответствует эквивалентному коэффициенту шума 17 дБ. Коэффициент усиления, обеспечиваемый комбинацией ADL5246 и HMC966 по умолчанию, можно оптимизировать для адаптации цифрового модема к замираниям в канале. Порог АРУ ADL5246 может быть установлен таким образом, чтобы коэффициент усиления начинал увеличиваться при падении BER приемника ниже предустановленного значения для заданного уровня сигнала КАМ. При таком гибридном подходе АРУ приемника будет активироваться только при очень низких уровнях входных сигналов для улучшения минимального уровня чувствительности приемника.

Заключение

Приемники радиорелейных линий СВЧ следующего поколения должны поддерживать ширину полосы канала от 3,5 до 112 МГц и иметь расширенный динамический диапазон, который позволял бы работать с сигналами КАМ высоких порядков и обеспечивать дополнительный запас по уровню для учета замираний канала. Подсистема приемника ПЧ AD6676 дает возможность построить обобщенную платформу, которая могла бы использоваться как в традиционных сплит-системах IDU/ODU, так и в более современных полнофункциональных системах ODU. В сплит-системах IDU/ODU исключительно высокий динамический диапазон компонента гарантирует превосходную точность восстановления модулированного сигнала (EVM) в присутствии близко расположенных помех без применения сложных перестраиваемых фильтров или имеющих большие габариты банков коммутируемых фильтров. В полнофункциональных системах ODU широкий мгновенный динамический диапазон компонента (и возможность непосредственного подключения к смесителю) позволяет сократить диапазон регулировки ВЧ-схемы АРУ, необходимый для адаптации к замираниям в канале, и упростить требования к фильтрации ВЧ-сигналов. AD6676 выпускается в 80-контактном корпусе WLCSР с большими габаритами (4,3×5,0 мм) и работает от напряжений питания 2,5 и 1,1 В.